

Leitartikel

Verändert der Mensch das Klima?

Diese Frage stellt sich nicht mehr

Mojib Latif

Prof. Dr. Mojib Latif, Ozeanzirkulation und Klimadynamik – Maritime Meteorologie – Leibniz-Institut für Meereswissenschaften, Duesternbrooker Weg 20, D-24105 Kiel (mлатиф@ifm-geomar.de)

1 Die Klimaproblematik

Angesichts der weltweit sich häufenden Wetterextreme während der letzten Jahrzehnte stellt sich die Frage, in wie weit die Zunahme von Wetterextremen, wie beispielsweise die Zunahme von Starkniederschlägen in Deutschland oder die Intensivierung tropischer Wirbelstürme (Hurrikane, Taifune), schon Anzeichen der globalen Erwärmung sind. Es gibt heute kaum noch einen Zweifel darüber, dass der Mensch Einfluss auf das weltweite Klima ausübt und dass sich das Weltklima in den nächsten Jahrzehnten folglich weiterhin erwärmen wird. In einer wärmeren Welt kann mehr Wasser verdunsten, wodurch sich individuelle Wetterphänomene verstärken können.

1.1 Kohlendioxid

Das Klimaproblem hat seinen Ursprung darin, dass der Mensch durch seine vielfältigen Aktivitäten bestimmte klima-relevante Spurengase in die Atmosphäre entlässt. Diese Spurengase führen zu einer zusätzlichen Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Luftschichten, dem 'anthropogenen Treibhauseffekt'. Von größter Bedeutung ist dabei das Kohlendioxid (CO_2), das vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Erdöl, Kohle, Erdgas) in die Atmosphäre entweicht. Der weltweite CO_2 Ausstoß ist eng an den Welt-Energieverbrauch gekoppelt, da die Energiegewinnung vor allem auf fossilen Energieträgern basiert. Andere wichtige Spurengase sind vor allem Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O) und die Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW). Das Kohlendioxid hat einen Anteil von ca. 50% an dem durch den Menschen verursachten (anthropogenen) Treibhauseffekt. Vom Menschen in die Atmosphäre emittiertes CO_2 hat eine typische Verweildauer von ca. 100 Jahren, was die Langfristigkeit des Klimaproblems verdeutlicht.

Der CO_2 Gehalt der Erdatmosphäre war seit Jahrtausenden nicht mehr so hoch wie heute. Messungen belegen zweifelsfrei, dass sich die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre seit Beginn der industriellen Revolution extrem erhöht hat. Lag der CO_2 Gehalt um 1800 noch bei ca. 280 ppm (ppm: parts per million), so liegt er heute schon bei fast 380 ppm. Es ist nicht mehr zu bestreiten, dass der Mensch für diesen Anstieg verantwortlich ist. Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass der CO_2 Gehalt heute schon so hoch ist wie seit ca. 450.000 Jahren nicht mehr (Abb. 1). Das belegen Untersuchungen, welche die Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre aus Eisbohrkernen der Antarktis rekonstruiert haben, indem die im Eis eingeschlossenen Luftbläschen analysiert wurden.

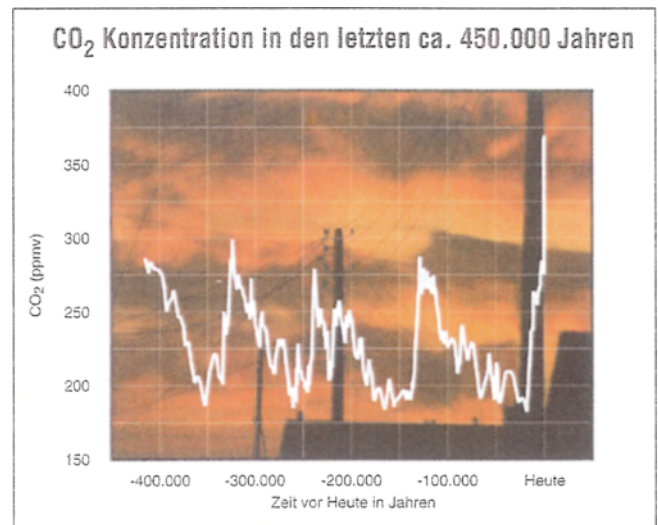


Abb 1: Der Kohlendioxid (CO_2) Gehalt der Erde in den letzten ca. 450.000 Jahren. Der Anstieg der CO_2 Konzentration seit Beginn der Industrialisierung ist offensichtlich und auf den Menschen zurückzuführen

2 Treibhauseffekt

2.1 Der natürliche Treibhauseffekt

Bei einer Erde ohne Atmosphäre wäre die Oberflächentemperatur ausschließlich durch die Bilanz zwischen eingestrahelter Sonnenenergie und der vom Boden abgestrahlten Wärme-(Infrarot-)Strahlung festgelegt. Diese Oberflächentemperatur würde im globalen Mittel etwa -18°C betragen. Selbst eine Atmosphäre aus reinem Sauerstoff und Stickstoff, welche die Hauptkomponenten unserer Atmosphäre (ca. 99%) bilden, würde daran nichts Wesentliches ändern.

Hingegen absorbieren bestimmte Spurengase, wie Wasserdampf und Kohlendioxid, die von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung und emittieren ihrerseits auch in Richtung der Erdoberfläche langwellige Strahlung. Dies führt zu einer **zusätzlichen Erwärmung** der Erdoberfläche (Abb. 2). Die Temperatur der Erdoberfläche beträgt daher im globalen Mittel ca. $+15^\circ\text{C}$. Dieser **natürliche Treibhauseffekt** ist dafür mitverantwortlich, dass es Leben auf unserem Planeten gibt. Die beteiligten Gase werden als 'Treibhausgas' bezeichnet.

2.2 Der zusätzliche (anthropogene) Treibhauseffekt und seine Folgen

Die Konzentration der langlebigen Treibhausgase nimmt systematisch zu: seit Beginn der Industrialisierung bis heute bei Kohlendioxid (CO_2) um ca. 30%, bei Methan (CH_4) um

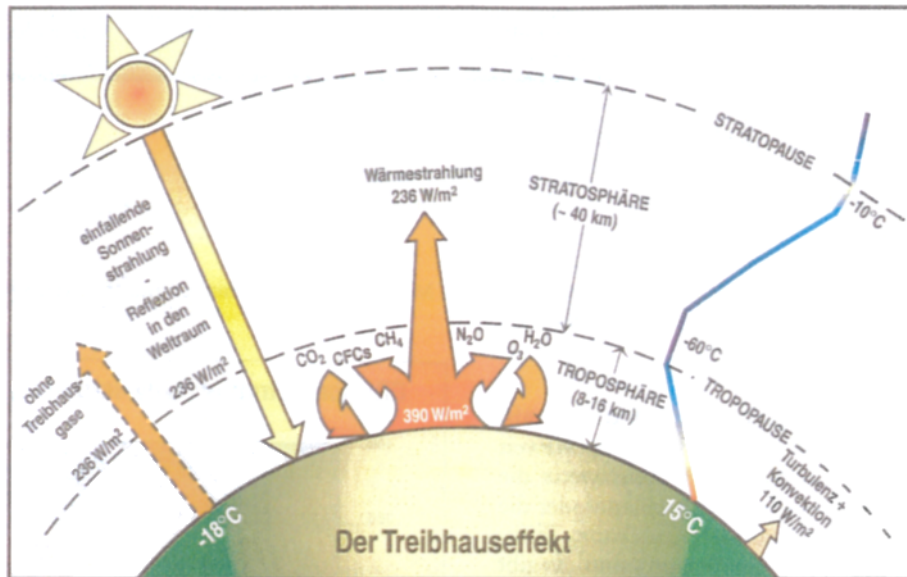


Abb. 2: Schematische Darstellung des Treibhauseffekts. Ohne ihn betrüge die Oberflächentemperatur der Erde ca. -18°C , sie beträgt aber tatsächlich ca. $+15^{\circ}\text{C}$ (natürlicher Treibhauseffekt). Der Anstieg der Treibhausgase durch den Menschen führt zu einer globalen Erwärmung und damit zu einer globalen Klimaveränderung (zusätzlicher oder anthropogener Treibhauseffekt)

120% und bei Distickstoffoxid (N_2O) um ca. 10%. Hierdurch wird eine langfristige zusätzliche Erwärmung der unteren Atmosphäre und der Erdoberfläche angestoßen. Ein **verstärkter Treibhauseffekt** führt auch zu Veränderungen des Niederschlags, der Bewölkung, der Meereisausdehnung, der Schneebedeckung und des Meeresspiegels sowie der Wetterextreme, d.h. letzten Endes zu einer **globalen Klimaveränderung**. Für die Menschheit besonders wichtig ist hierbei die mögliche Änderung der Extremwertstatistik, was anhand der Elbe-Flut 2002 und der Dürre 2003 deutlich geworden ist. Aber auch die Veränderungen in den Gebirgsregionen können dramatische Ausmaße annehmen. Dies erkennt man vor allem an dem Rückzug der Gebirgsgletscher in den Alpen, die seit 1850 bereits etwa die Hälfte ihres Volumens verloren haben. Die Gletscher werden sich aber noch weiter zurückziehen. Die meisten Alpengletscher wären schon in etwa fünfzig Jahren unter Annahme eines 'business as usual' (BAU)-Szenariums verschwunden, d.h. wenn keine Maßnahmen unternommen werden, um den anthropogenen Treibhauseffekt abzumildern. Die Permafrostgebiete (Regionen, in denen die Böden praktisch das ganze Jahr über gefroren sind und nur oberflächlich im Sommer leicht antauen) werden sich ebenfalls zurückziehen. Die Folgen im Gebirge wären unübersehbar, da der Rückzug des Permafrostes die Stabilität ganzer Berglandschaften gefährden könnte. Bis jetzt nicht gekannte Hangabruptungen und Murenabgänge (Schlamm- und Gerölllawinen) könnten die Folgen sein.

Als Folge der globalen Erwärmung wird der Meeresspiegel ansteigen, zum einen infolge der Wärmeausdehnung der Meere (thermische Expansion) und zum anderen infolge der Eisschmelze. Der Anstieg des Meeresspiegels infolge der thermischen Expansion kann bis zum Jahr 2100 bis zu 80 cm betragen. Falls die großen Eispanzer Grönlands oder der Antarktis schmelzen sollten, wären noch deutlich stärkere Anstiege zu erwarten. So würde beispielsweise ein vollständiges Abschmelzen des grönländischen Eispanzers den Mee-

resspiegel um weltweit sieben Meter ansteigen lassen. Allerdings wird die Frage der Stabilität der großen Eisschilde innerhalb der Klimaforschung noch kontrovers diskutiert.

3 Die Wissenschaft hat den Beweis bereits angetreten

Es drängt sich die Frage auf, was man schon heute an Klimaänderung beobachten kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Klima auf äußere Anregungen immer mit einer Zeitverzögerung von einigen Jahrzehnten reagiert. Die globale Mitteltemperatur der Erde aber zeigt bereits einen offensichtlichen Erwärmungstrend in den letzten 100 Jahren (**Abb. 3**). Zusammen mit weiteren statistischen und auf Modellen basierenden Analysen (Fingerabdruckmethoden) kann man heute bereits sagen, dass der beobachtete Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vor allem auf den Menschen zurückgeht. Es hat zwar in der Vergangenheit immer wieder Klimaschwankungen gegeben, die nicht auf menschliche Aktivität zurückgehen, wie z.B. die mittelalterliche Warmzeit oder die kleine Eiszeit; diese waren allerdings im Vergleich zum Anstieg der Temperatur der letzten Jahrzehnte deutlich schwächer, zumindest im globalen Maßstab.

Es wird immer wieder die Frage nach der Rolle der Sonne für die Erderwärmung gestellt. Die Sonneneinstrahlung unterliegt Schwankungen, die auch mit der Sonnenfleckenaktivität zusammenhängen. Gemittelt über die letzten 100 Jahre stieg die Solarkonstante an: Nach Schätzungen liegt sie zur Zeit etwa 0,25% höher als vor 100 Jahren. Klimamodellsimulationen zeigen, dass in den letzten 100 Jahren durch den Anstieg der Sonnenintensität ein Teil der beobachteten Erwärmung erklärt werden kann, allerdings mit etwa 0,2°C nur ungefähr ein Drittel der Gesamterwärmung. Die Sonnenvariabilität allein kann also nicht für den beobachteten Temperaturanstieg der letzten 100 Jahre von ca. 0,6°C verantwortlich sein; somit muss der überwiegende Anteil an der Erderwärmung vom Menschen verursacht sein. Dies ist

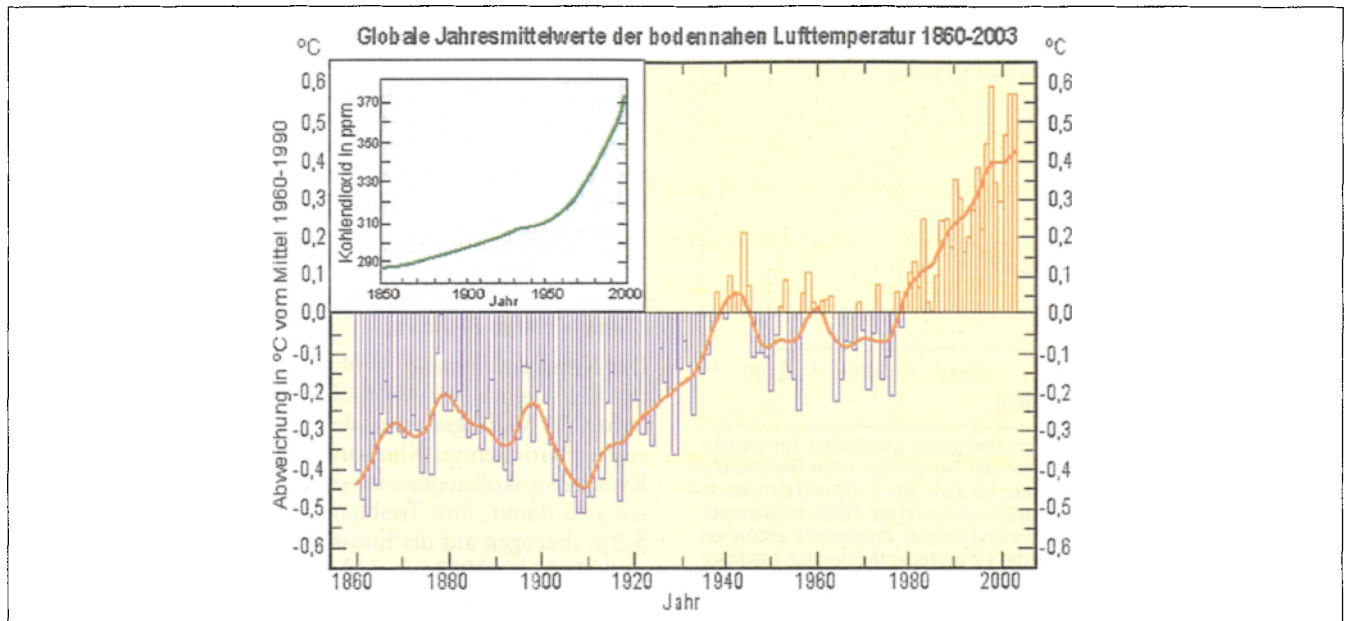


Abb. 3: Die globale Mitteltemperatur der Erde seit 1860. Man erkennt einen deutlichen Erwärmungstrend in den letzten 100 Jahren. Die Werte sind Abweichungen vom Mittelwert der Jahre 1961–1990. Das kleine Bild zeigt die Entwicklung des CO₂ Gehaltes

Konsens in der internationalen Klimaforschung: der Einfluss des Menschen auf das Klima ist erkennbar. Insofern kann es heute nicht mehr darum gehen, ob der Mensch das Klima beeinflusst, sondern nur noch darum, in wieweit er die Klimaerwärmung noch reduzieren kann.

4 Klimavorhersage: Die Statistik der Ereignisse

In wieweit reagieren chaotische Systeme wie das Klima auf menschliche Einflüsse und können sie überhaupt berechnet werden? Am besten vergleicht man den Einfluss des Menschen auf das Klima mit einem 'gezinkten' Würfel. Das Zinken besteht darin, dass wir die Temperatur der Erde infolge des Ausstoßes bestimmter klimarelevanter Gase, wie beispielsweise des Kohlendioxid, erhöhen. Dies führt zu mehr Wetterextremen, so wie der gezinkte Würfel mehr Sechsen hervorbringt. Wir können aber nicht sagen, wann die nächste Sechse kommt, denn die Reihenfolge der Zahlen bleibt zufällig. Ähnlich verhält es sich mit den Wetterextremen: Wir können zwar ihre Statistik berechnen, beispielsweise dass sie sich infolge der globalen Erwärmung häufen werden, wir wissen aber nicht, wann genau die Wetterextreme eintreten. Dies erklärt auch, warum längerfristige Klimavorhersagen möglich sind, obwohl Wettervorhersagen prinzipiell auf kurze Zeiträume beschränkt sind.

Das Beispiel des gezinkten Würfels verdeutlicht auch den folgenden Aspekt: die Tatsache, dass ein bestimmtes Ereignis schon einmal beobachtet worden ist, lässt keinerlei Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Würfels zu; der Würfel hat auch vor dem Zinken schon Sechsen geliefert. Die Tatsache, dass beispielsweise schon einmal eine schwere Überschwemmung oder eine langanhaltende Trockenperiode beobachtet worden ist, bedeutet nicht, dass sich die Statistik des Wetters nicht verändert hätte. In der Tat zeigen Beobachtungen der letzten hundert Jahre, dass sich extreme Wetterereignisse weltweit häufen, wie von den Klimamodellen

vorhergesagt. Und es ist genau diese Häufung extremer Wetterereignisse, die man der globalen Erwärmung zuordnen kann. Die Analogie zum gezinkten Würfel verdeutlicht darüber hinaus, dass es prinzipiell nicht möglich ist, einzelne Wetterextreme, wie die Elbefflut des Jahres 2002 oder den Rekordsummer 2003, der globalen Erwärmung zuzuschreiben, genauso wenig, wie man eine bestimmte Sechse dem Zinken des Würfels zuordnen kann. Man muss immer die Statistik der Ereignisse betrachten, wie etwa die Anzahl von Wetterextremen über einen längeren Zeitraum, wenn man den Zusammenhang zwischen Wetterextremen und der globalen Erwärmung beleuchten möchte.

5 Wie wird das Klima im Europa des 21. Jahrhunderts aussehen?

Die Folgen für das Klima der Erde können mit Hilfe von Computersimulationen abgeschätzt werden. Dazu werden globale Klimamodelle entwickelt, welche die Wechselwirkung zwischen den physikalischen Prozessen in Atmosphäre, Ozean, Meereis und Landoberflächen quantitativ beschreiben. Mit einem am Max-Planck-Institut für Meteorologie entwickelten Modell wurde das Klima von 1860 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts simuliert. Dabei wurden die wichtigsten Treibhausgase und Sulfat-Aerosole berücksichtigt, inklusive deren Einfluss auf die Wolkenbildung. Für die Vergangenheit (1860 bis heute) wurden die beobachteten Konzentrationen bzw. Emissionen vorgeschrieben, während für die Zukunft angenommen wurde, dass sich die heute beobachteten Trends unvermindert fortsetzen. In dieser Simulation wird bis heute eine globale Erwärmung seit Ende des 19. Jahrhunderts von etwa 0,6°C berechnet, was mit den Beobachtungen übereinstimmt (Abb. 4). Die globale Erwärmung bis zur Mitte dieses Jahrhunderts, d.h. die Differenz der Dekadenmittel (2040 bis 2049) minus (1990 bis 1999) liegt bei etwa 0,9°C. Die Erwärmung der Kontinente ist mit 1,4°C etwa doppelt so groß wie die der Ozeane. Bis

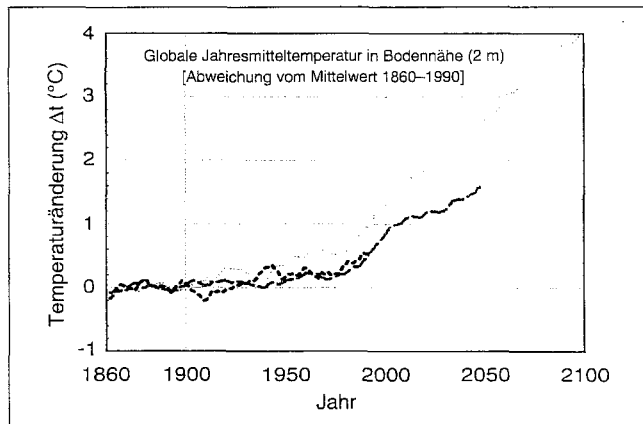


Abb. 4: Die Entwicklung der beobachteten global gemittelten Temperatur seit 1860 (punktierte Linie). Simulation der Temperatur unter Berücksichtigung des Anstiegs der Treibhausgase bis zum Jahr 2100 und Simulation der Temperatur unter zusätzlicher Berücksichtigung der Aerosole (Schwebstoffe, die u.a. auch bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen und einen kühlenden Einfluss auf die Oberflächentemperatur besitzen) bis zum Jahr 2050

zum Jahr 2100 kann die globale Erwärmung je nach angenommenem Szenarium bis zu 4°C im globalen Mittel betragen. Zusammen mit der heute bereits realisierten globalen Erwärmung von etwa 0,6°C entspräche dies fast dem Temperaturunterschied von der letzten Eiszeit bis heute. Es würde sich also um eine für die Menschheit einmalig extrem schnelle globale Klimaänderung handeln, für die es in der letzten Million Jahre kein Analogon gäbe.

Die globale Erwärmung hat eine Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfs zur Folge sowie einen verstärkten Wasserdampftransport von den Ozeanen zu den Kontinenten und damit eine Zunahme des Niederschlags über den Landgebieten. Regional sind die Niederschlagsänderungen jedoch sehr verschieden. Dabei fällt generell mehr Niederschlag in hohen Breiten und in Teilen der Tropen, während die regenärmeren Subtropen noch weiter austrocknen. Damit vergrößern sich die Unterschiede zwischen den feuchten und trockenen Klimaten auf der Erde.

Diese Aussage gilt auch für das Klima in Europa. Allerdings sind die Niederschlagstendenzen in den Winter- bzw. Sommermonaten sehr unterschiedlich. Während der Sommer-niederschlag fast überall in Europa abnimmt, wird im Winter ein ausgeprägtes Nord-Süd-Gefälle vorhergesagt mit einer Abnahme im niederschlagsarmen Südeuropa und einer Zunahme im niederschlagsreichen Mittel- und Nordeuropa. Diese Zunahme hängt zusammen mit intensiverer winterlicher Sturmaktivität über dem Nordostatlantik und verstärkten Westwinden, die feuchte Luft vom Atlantik heranzuführen. Auffällig ist eine Häufung von Starkniederschlägen sowohl im Winter wie auch im Sommer und damit eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Überschwemmungen. Die Anzahl von Frosttagen wird in Europa bis zur Mitte dieses Jahrhunderts deutlich abnehmen, während sich die Anzahl von Hitzetagen (Temperaturen über 30°C) um etwa dreißig Tage stark erhöhen wird. Nach neuesten Berechnungen mit hochauflösenden regionalen Klimamodellen wird sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von sehr trockenen und sehr warmen Sommern in Europa dramatisch erhöhen. Sommer,

wie der des Jahres 2003, würden im Jahr 2070 im Mittel alle zwei Jahre auftreten.

Tropische Wirbelstürme wird es trotz der globalen Erwärmung bei uns nicht geben. Dies liegt daran, dass für die Entwicklung von Hurrikanen oder Taifunen eine Meerestemperatur von mindestens 26,5°C erforderlich ist. Derart hohe Meerestemperaturen sind für den Nordatlantik nicht zu erwarten.

6 Das Kyoto-Protokoll, ein erster wichtiger Schritt in die richtige Richtung

Die Klimaproblematik steht inzwischen an oberster Stelle auf der Agenda der Weltpolitik. Am 10. Dezember 1997 haben die Vertragsstaaten der Rahmenkonvention der Vereinten Nationen zu Klimaänderungen einstimmig das sog. Kyoto-Protokoll angenommen. Die Industrieländer verpflichten sich damit, ihre Treibhausgasemissionen um im Mittel 5,2% (bezogen auf die Emission im Jahre 1990) bis zur Periode 2008 bis 2012 zu mindern. Mit der Ratifizierung Russlands im Februar 2005 ist das Kyoto-Protokoll völkerrechtlich verbindlich. Die Europäische Union muss im Mittel um 8% reduzieren, stärker als die USA mit 7% oder Japan mit 6%. Russland soll nur stabilisieren und Norwegen darf gar zulegen. Diese unterschiedlichen Minderungssätze sind Resultat nachweislich unterschiedlicher Bedingungen, aber auch teilweise Folge des Verhandlungsgeschicks einzelner Länder. Die USA haben sich allerdings inzwischen vom Kyoto-Protokoll losgesagt. Auch die Schwellenländer, wie China oder Indien, sind im Kyoto-Protokoll nicht berücksichtigt.

Den aus Sicht der Klimaforscher notwendigen Klimaschutz liefert das Kyoto-Protokoll in der gegenwärtigen Form keineswegs. Um gravierende Klimaänderungen in den nächsten hundert Jahren zu vermeiden, müsste der Ausstoß von Treibhausgasen auf ein Bruchteil (<5%) des heutigen Ausstoßes bis zum Jahr 2100 reduziert werden. In der Zukunft muss daher der Einführung der regenerativen Energien mehr Gewicht beigemessen werden, denn nur diese, insbesondere die Sonnenenergie, stehen unbegrenzt zur Verfügung. Da das Klima nur auf unsere langfristige Strategie reagiert, kann der Umbau der Wirtschaft in Richtung der erneuerbaren Energien allmählich innerhalb der nächsten hundert Jahre erfolgen. Wichtig ist aber, dass wir heute bereits alle Energiesparpotentiale ausschöpfen und den Weg der Reduzierung der Treibhausgasemissionen beschreiten. Insofern ist das Kyoto-Protokoll ein erster, wichtiger Schritt in die richtige Richtung.

Wenn wir heute die Weichen für eine nachhaltige Entwicklung stellen, dann ist dies auch in ökonomischer Hinsicht sinnvoll, denn es ist bekannterweise insgesamt kostensparender, Vorsorge zu treffen, als die sich in der Zukunft häufenden klimabedingten Schäden zu begleichen. Die Dimension der Schäden der Elbe-Flut hat uns dies nur zu deutlich vor Augen geführt. Darüber hinaus sollten wir nicht mit unserem Planeten experimentieren, da die Vergangenheit immer wieder gezeigt hat, dass vielerlei Überraschungen möglich sind. So wurde beispielsweise das Ozonloch über der Antarktis von keinem Wissenschaftler vorhergesagt, obwohl die ozonschädigende Wirkung der FCKWs bekannt war. Das Klimasystem ist ein nichtlineares System, das bei starken Auslenkungen für uns alle verblüffende Lösungen bereithalten kann.